# 丽斗蟋翅二型雄虫食物消化能力及消化酶活性比较

赵吕权，吴红军，朱道弘*

（中南林业科技大学昆虫行为与进化生态学实验室，长沙 410004）

**摘要：**【目的】丽斗蟋 *Velarifictorus ornatus* 具明显的翅二型现象，为探讨翅型分化对丽斗蟋翅二型雄虫消化能力及中肠内消化酶活性产生的影响，对长翅型与短翅型雄虫食物消化能力及中肠内消化酶活性进行了检测比较。【方法】我们采取重量营养指数测定了羽化后 12 d 内丽斗蟋两型雄成虫增长量、相对增长率、取食量、食物利用率、近似消化率和食物转化率。为进一步明确丽斗蟋翅二型成虫食物消化能力与中肠内消化酶活性的关系，我们采用 4 种专用底物测定了中肠内用于分解蛋白质、脂肪和碳水化合物的总蛋白酶、胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶的活性。【结果】结果表明，丽斗蟋两型雄虫取食量、食物转化率、食物利用率与增长量均无统计差异，但中肠内消化酶活性变化规律不同。成虫羽化后 4 d 时，长翅型雄虫中肠内总蛋白酶与胰蛋白酶活性显著高于短翅型雄虫，相反，羽化后 0 d 时，短翅型雄虫中肠内总蛋白酶与胰蛋白酶活性则显著高于长翅型雄虫，而羽化后 12 d 时，虽然短翅型雄虫总蛋白酶活性高于长翅型雄虫，但胰蛋白酶活性在两型雄虫间并无差异。成虫羽化后 0 d 时，两型雄虫脂肪酶活性无差异，但无论是羽化后 4 或 12 d，长翅型雄虫中肠内脂肪酶活性皆显著大于短翅型雄虫。成虫羽化后 4 d 时，短翅型雄虫中肠内淀粉酶活性显著高于长翅型雄虫，而羽化后 0 与 12 d 时，两型雄虫间无显著差异。【结论】丽斗蟋翅二型雄虫食物消化能力无显著差异，但羽化后不同时间，中肠内消化酶活性存在差异，该差异可能与成虫羽化后不同时期，翅二型雄虫在飞行与繁殖投资中对不同能源物质的需求有关。

**关键词：**丽斗蟋；翅二型；酶活性；食物利用率；消化酶；资源分配

**中图分类号：**Q968　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**0454-6296(2015)07-0731-08

# Comparison of digestive capability and digestive enzyme activities in male adults of the wing-dimorphic cricket *Velarifictorus ornatus* (Orthoptera: Gryllidae)

ZHAO Lü-Quan, WU Hong-Jun, ZHU Dao-Hong* (Laboratory of Insect Behavior and Evolutionary Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:**【Aim】The cricket species *Velarifictorus ornatus* displays distinct wing dimorphism. In order to understand the effect of wing dimorphism on the digestive capability and digestive enzyme activities, we investigated the food utilization efficiency and digestive enzyme activities in long-winged (LW) and short-winged (SW) male adults.【Methods】To evaluate the food utilization efficiency of males in *V. ornatus*, we calculated the gravimetric nutritional indexes of male adults of *V. ornatus* in the first 12 days after last molt, including food consumption (CR), growth (GR), relative growth (RGR), approximate digestibility (AD), efficiency of conversion of ingested food to body matter (ECI), and efficiency of conversion of digested food to body matter (ECD). In order to further explore the relationship between food utilization efficiency and digestive enzyme activities, we analyzed the activities of four enzymes (total protease, trypsin, lipase, and amylase) that are primary enzymes for protein, fat, and carbohydrate processing, respectively, by using four special substrates.【Results】No significant difference was observed in all the gravimetric nutritional indexes between LW and SW males of *V. ornatus*, but the activities of digestive enzymes showed difference between LW and SW males. Total protease activity was

基金项目：国家自然科学基金项目(31200494)；湖南省高校创新平台开放基金项目(12K068)

作者简介：赵吕权，男，1980 年生，江苏泗洪人，博士，副教授，研究方向为昆虫进化生态学，E-mail: zhaolvquan80@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: daohongzhu@yeah.net

收稿日期 Received: 2015-01-27；接受日期 Accepted: 2015-05-12

significantly higher in SW males than in LW males on day 0 and day 12 after emergence, but lower in SW males than in LW males on day 4 after emergence. Lipase activity was similar in both LW and SW males on day 0 after emergence, but increased significantly higher in LW males afterwards. Amylase activity was significantly higher in SW males than in LW males on day 4 after emergence, but not significantly different between them on day 0 or day 12 after emergence. 【Conclusions】 Our findings indicated that there is no difference in digestive capability between LW and SW male adults of *V. ornatus*, but obvious difference exists in digestive enzyme activities between them, which might be correlated with the different resource needs for the development of flight muscles and reproductive organs at different period after adult emergence.

**Key words**: *Velarifictorus ornatus*; wing dimorphism; enzyme activity; food utilization efficiency; digestive enzyme; resource allocation

表型可塑性(phenotypic plasticity)是有机体适应环境时间与空间变化的一种策略,具有表型可塑性的有机体可以根据环境的变化而表现出不同表型,从而降低不利环境条件下非理想表型表达的代价(Stears, 1976)。多型现象(polymorphism)是由多基因型控制,但能根据外界环境条件变化而表现出不同表型的一种表型可塑性形式(Mitra *et al.*, 2011)。翅多型是昆虫进化过程中普遍存在的一种表型多型现象,如褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、长颚斗蟋 *Velarifictorus asperses* 等都存在具飞行能力的长翅型和不具飞行能力的短翅型(Langellotto *et al.*, 2000; 曾杨等, 2012);甚至一些昆虫如甘蔗异背红蝽 *Cavelirius saccharivorus* 还会出现少量中间类型(Fujisaki, 1992)。翅多型现象至少存在于鞘翅目、双翅目、半翅目、同翅目、膜翅目、直翅目、鳞翅目、缨翅目等10 目昆虫中(Zera and Denno, 1997)。对具翅多型现象昆虫而言,当其处于动荡环境条件时,为达到种群适合度的最大化,不同环境条件下,往往会表现出不同表型(Guerra, 2011)。通常长日照、高温和高密度诱发长翅型表型的出现;短日照、低温和低密度则促进短翅型表型的出现(Zera and Denno, 1997)。

对翅二型雌虫而言,长翅型个体具发达飞行肌且能够飞行;相反,短翅型个体不具飞行能力,但成虫羽化后早期,短翅型雌虫能快速产卵,产卵量也多于长翅型个体(Zera and Denno, 1997)。Mole 和 Zera (1993, 1994)对 *Gryllus rubens* 和 *Gryllus firmus* 两型雌虫食物消化与利用的研究结果表明,成虫羽化后早期,虽然两型雌虫的消化系数相似,但短翅型雌虫食物转化率显著高于长翅型雌虫,表明短翅型雌虫在成虫羽化后将更多的能源物质转化为生物量,为其羽化后更强的繁殖能力提供了资源保障。

翅二型雄虫飞行肌与繁殖器官间发育同样存在明显不同,曲脉姬蟋 *Modicogryllus confirmatus* 短翅型雄虫精巢与附腺发育都明显快于长翅型雄虫,而飞行肌则与性腺发育模式完全相反(Tanaka, 1999)。*Velarifictorus aspersus* 成虫羽化后早期,虽然两型雄虫精巢发育速率相似,但短翅型雄虫附腺发育速率则显著快于长翅型雄虫,而长翅型雄虫飞行肌重量则显著高于短翅型雄虫(Zeng and Zhu, 2012)。无翅红蝽 *Pyrrhocoris apterus* 成虫羽化后早期,不仅短翅型雄虫附腺发达于长翅型雄虫(Socha and Hodkova, 2006),两型雄虫在飞行肌与繁殖器官间的资源分配模式上也存在差异,长翅型雄虫首先将获得的资源用于发育飞行肌,而短翅型雄虫则首先将获得的资源用于发育繁殖器官(Socha *et al.*, 2004; Socha and Kula, 2008)。另外,短翅型雄虫对长翅型雄虫繁殖优势不仅体现在繁殖器官的发育,部分翅二型昆虫的短翅型雄虫在性成熟时间、交配频度及交配竞争力方面表现出对长翅型雄虫优势(Fujisaki, 1992; Socha, 2004; Mitra *et al.*, 2011)。与短翅型雌虫为获得繁殖优势仅需发育卵巢不同,短翅型雄虫为获得这些繁殖优势,涉及精包形成、鸣声(召唤声与求偶声)、打斗等多方面繁殖投资,而这些繁殖投资都需消耗能量。虽然翅二型雄虫飞行与繁殖发育存在差异已有系列研究,但两型雄虫对食物消化能力及中肠内消化酶活性是否存在差异还未见报道,特别是雄虫对繁殖投资的多样性,两型雄虫对食物的消化利用可能更显复杂。

丽斗蟋 *Velarifictorus ornatus* 具明显的翅二型现象,长翅型雄虫飞行肌发育程度发达于短翅型雄虫,两型雄虫精巢与附腺发育速率相似,但两型雄虫精巢与附腺内能源物质分配存在不同(Zhao *et al.*, 2010; 赵吕权, 2012)。同时,我们在前期研究中发现,两型雄虫因鸣声存在差异,短翅型雄虫对长翅型雄虫具更强的交配竞争力(赵吕权等, 待发表资

料)，而雄虫鸣叫会消耗大量能量。本研究以丽斗蟋为研究材料，采取重量营养参数分析两型雄虫对食物利用能力，检测并比较羽化后不同时期两型雄虫中肠内消化酶活性，以明确两型雄虫对食物的消化能力及羽化后不同时期两型雄虫中肠内消化酶活性是否差异。

# 1　材料与方法

## 1.1　供试昆虫与饲养方法

丽斗蟋若虫于2005年4月采自株洲市郊(27.8°N, 113.2°E)，采集的若虫带回实验室进行累代饲养，本实验所用样本全部来自本次采集标本饲养的后代，具体饲养方法参照赵吕权等(2008)及Zhao等(2010)，若虫孵化后至羽化前的处理方法同赵吕权等(2012)。

## 1.2　翅二型个体食物消化能力测定

待若虫接近羽化时，每日检查成虫羽化情况，成虫羽化当日以电子天平称量其体重(0.0001 g)，尔后，置于塑料容器内(13 cm×13 cm×8.5 cm)单独饲养，容器内放置已预称重的昆虫饲料。实验开始后，每两日更换一次昆虫饲料并称量以下指标：(1)昆虫体重；(2)放入的食物重量；(3)取食后剩余食物及排泄物重量。由于食物颜色呈棕色而排泄物呈黑色，因此很容易将两者分离，待两者从容器内分离后，置于110℃烘箱内烘干12 h，称量干重。根据饲料鲜重与干重标准曲线推算昆虫取食的食物干重，食物烘干方法同上。为保证食物的一致性，此次实验的昆虫饲料来自同一批次，且将食物从容器内取出后置于一密闭的容器内，以保证饲料在实验进行期间不会失水。丽斗蟋长翅型雄虫飞行肌在羽化后第3天时达到最大值，尔后出现降解，10 d后飞行肌重量维持稳定(Zhao *et al*., 2010)，因此，我们测定了翅二型雄虫羽化后12 d内食物消化能力。食物消化能力主要用成虫增长量、相对取食量、消费量、食物转化率、近似消化系数及食物利用率等指标进行评价。为计算刚羽化成虫干重，实验开始时设置了两组平行实验，根据另一组成虫鲜重与干重曲线计算实验组羽化当日成虫干重。有关指标的计算方法根据Mole和Zera(1993)及王琛柱(1997)的方法，具体根据以下公式进行计算：(1)增长量=试前虫体干重-试后虫体干重；(2)取食量=试前食物干重-试后食物干重；(3)食物利用率=增长量/取食量×100%；(4)近似消化率=(取食量-排泄物重)/取食量×100%；(5)食物转化率=增长量/(取食量-排泄物重)×100%；(6)相对增长率=增长量/试前体重。长、短翅型成虫各有12~15个个体重复。

## 1.3　中肠湿重测定

羽化当日成虫定义为羽化后0 d，成虫羽化后0, 4和12 d时，用昆虫针将丽斗蟋雄成虫固定于蜡盘上，用解剖剪从尾部开始经前胸背板将其分开，移取丽斗蟋整个消化道至载玻片上，然后从前端前胃连接处，后端马氏管着生处截取中肠，滤纸吸干中肠表面水分，电子天平称量中肠湿重(0.0001 g)。每个处理天数，长、短翅型成虫各有12~15个个体重复。

## 1.4　中肠酶液制备

丽斗蟋成虫羽化后分别单独饲养，并提供绝对充足的食物和水源。由于丽斗蟋长翅型雄虫羽化后第5天开始出现飞行肌降解，10 d后飞行肌维持稳定(Zhao *et al*., 2010)，且成虫羽化后0-4 d内短翅型雄虫取食量大于长翅型雄虫(吴红军, 2014)，因此我们选择羽化后0, 4和12 d体重相似成虫，对其进行解剖。解剖前先将蟋蟀个体置于冰面上麻醉2 min，用预冷的0.15 mol/L NaCl溶液冲去体液，截取中肠及其内含物，然后置于0.15 mol/L NaCl溶液中于冰浴内匀浆，以10 000 r/min 4℃离心15 min，取上清液作为测试中肠酶液。每个处理天数，长、短翅型成虫各有12~15个个体重复。

## 1.5　消化酶活性测定

**1.5.1**　总蛋白酶：总蛋白酶活性测定参照孔海龙等(2012)方法。以氨苯磺胺偶氮酪蛋白(azocasein)(Sigma-Aldrich Trading Co., Ltd)为底物，将偶酪蛋白以20 mg/mL溶于0.15 mol/L的NaCl溶液。取该溶液50 μL，加入缓冲溶液(pH 10.5, 0.2 mol/L甘氨酸-氢氧化钠)30 μL，中肠酶液20 μL，在30℃反应2 h，加入100 μL 20%(m/v)三氯乙酸终止反应。反应混合物在11 200 g 4℃下离心15 min后，取上清液在366 nm测定吸光值，每个数值测3次，取平均值。反应混合物1个吸收单位的变化定义为1个偶氮酪蛋白单位(1 U)。

**1.5.2**　强碱性类胰蛋白酶：强碱性类胰蛋白酶活性测定参照孔海龙等(2012)方法。α-N-苯甲酰-DL-精氨酸-p-硝基苯胺(BAPNA)(Sigma-Aldrich Trading Co., Ltd)以20 mg/mL溶于二甲基亚砜作为底物。取40 μL BAPNA溶液，加入1.4 mL的反应缓冲液(pH为10.5, 0.1 mol/L甘氨酸-氢氧化钠)，40 μL的中肠酶液，30℃反应2 h后加入0.5 mL 30%(v/

v)的乙酸,终止反应。在405 nm 下测定吸光值,每个数值测3次,取平均值。产物的摩尔消光系数为8 800,酶活性用 μmoL/mg pro · min 表示。

**1.5.3** 淀粉酶: 淀粉酶活性测定采用碘-淀粉比色法。酶活力单位定义:组织中每毫克蛋白在37℃与底物作用30 min,水解10 mg淀粉定义为1个淀粉酶活力单位,以U/mg pro 表示。测定时,每个数值测3次,取平均值。

**1.5.4** 脂肪酶:脂肪酶活性测定采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒。脂肪酶单位定义:在37℃条件下,每克组织蛋白在反应体系中与底物反应1 min,每消耗1 μmol底物为一个酶活力单位。测定时,每个数值测3次,取平均值。

### 1.6 数据统计与分析

所得数据用平均值±标准差来表示,翅二型雄虫间的食物消化能力及酶活性差异比较采用Student's *t*-test,所用软件为SPSS13.0。

## 2 结果

### 2.1 丽斗蟋翅二型雄虫中肠湿重比较

丽斗蟋成虫羽化0 d时,长翅型雄虫中肠湿重为1.5±0.3 mg(平均值±标准差,下同),短翅型雄虫中肠湿重则为1.4±0.3 mg,两型雄虫中肠湿重相似且无统计差异(*t* 检验, $P>0.05$,图1)。成虫羽化后4 d时,丽斗蟋长、短翅型雄虫中肠湿重都出现了明显增加的过程,且短翅型雄虫中肠湿重显著重于长翅型雄虫(*t* 检验, $P<0.05$,图1)。与成虫羽化0 d相似,成虫羽化后12 d时,翅二型雄虫中肠湿重也无明显差异(*t* 检验, $P>0.05$,图1)。

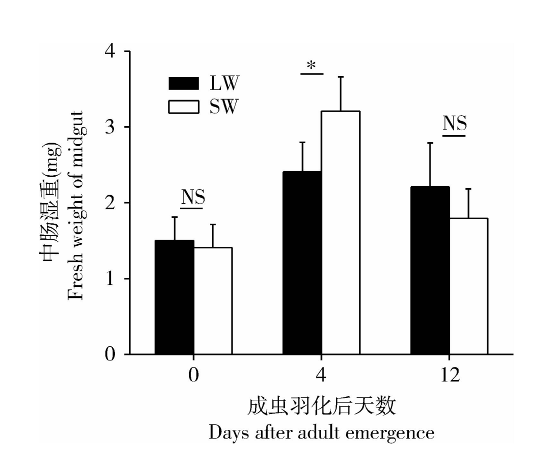



图1 丽斗蟋长翅型(LW)与短翅型(SW)雄成虫羽化后12 d内中肠湿重比较

Fig. 1 Comparison of midgut fresh weight in 0–12 day-old long-winged (LW) and short-winged (SW) male adults of *Velarifictorus ornatus*

图中数值为平均值±标准差;星号表示长、短翅型间存在显著性差异(*t* 检验, $P<0.05$),NS表示长、短翅型间无显著性差异(*t* 检验, $P<0.05$)。下图同。Data in the figure are mean ± *SD*. The asterisk indicates significant difference between long-winged and short-winged males at the same day-old (*t*-test, $P<0.05$), while NS indicates no significant difference between long-winged and short-winged males of the same day-old (*t*-test, $P>0.05$). The same for the following figures.

### 2.2 丽斗蟋翅二型雄虫食物消化能力比较

丽斗蟋雄虫羽化后12 d内,长翅型雄虫增长量为9.6±2.5 mg,短翅型雄虫的增长量为7.3±1.6 mg,两型雄虫增长量相似无统计差异,相对增长率也表现出相似的规律(*t* 检验, $P>0.05$,表1)。同样,长翅型雄虫与短翅型雄虫取食量、食物利用率、转化率及近似消化率也相似无显著差异(*t* 检验,$P>0.05$,表1)。

### 2.3 丽斗蟋翅二型雄虫消化酶活性差异

丽斗蟋成虫羽化后0和12 d时,短翅型雄虫中肠内总蛋白酶活性显著高于长翅型雄虫,而羽化后4 d时则与上述结果相反,长翅型雄虫中肠内总蛋白酶活性显著高于短翅型雄虫(*t* 检验, $P<0.05$,

**表1 丽斗蟋翅二型雄虫羽化后12 d内食物消化能力比较**

**Table 1 Comparison of food utilization efficiency in the wing-dimorphic male adults of *Velarifictorus ornatus* in 12 days after emergence**

| 翅型 Wing morphism | 增长量(mg) GR | 相对增长率(%) RGR | 取食量(mg) CR | 食物利用率(%) ECI | 近似消化率(%) AD | 食物转化率(%) ECD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 长翅型雄虫 Long-winged male | 9.6±2.5 a | 17.9±13.3 a | 44.5±3.6 a | 20.2±11.5 a | 76.3±8.2 a | 27.1±14.5 a |
| 短翅型雄虫 Short-winged male | 7.3±1.6 a | 17.7±9.8 a | 49.2±3.8 a | 14.9±7.4 a | 70.3±8.9 a | 22.4±12.6 a |

GR: 增长量 Growth; CR: 取食量 Consumption; ECI: 食物利用率 Efficiency of conversion of ingested food into body matter; AD: 近似消化率 Approximate digestibility; ECD: 食物转化率 Efficiency of conversion of digested food into body matter. 表中数据为平均值±标准差;同列数据后相同字母表示长翅型与短翅型雄虫间无显著差异(*t* 检验, $P>0.05$)。Data in the table are mean ± *SD*. The same letter following the data within a column indicates no significant difference between long-winged and short-winged males (*t*-test, $P>0.05$).

图 2）。成虫羽化后 0 d 时，与总蛋白酶活性相似，短翅型雄虫中肠内胰蛋白酶活性高于长翅型雄虫，羽化后 4 d 时长翅型雄虫则高于短翅型雄虫（*t* 检验，$P<0.05$，图 3）；与总蛋白酶不同，成虫羽化后 12 d 时，翅二型雄虫中肠内胰蛋白酶活性相似而无统计差异（*t* 检验，$P>0.05$，图 3）。脂肪酶活性在成虫羽化当日，长、短翅型雄虫脂肪酶活性分别仅为 186.8 ± 19.1 和 136.2 ± 23.1 U/g pro，且两者间无显著差异（*t* 检验，$P>0.05$，图 4）；羽化后 4 d 时，长、短翅型脂肪酶活性则分别增加为 1 747.5 ± 313.3 和 1 249.3 ± 136.7 U/g pro，增加了近 10 倍，同时，长翅型雄虫中肠内脂肪酶活性显著高于短翅型雄虫中肠内消化酶活性；与羽化后 4 d 相似，羽化后 12 d 时长、短翅型雄虫间也表现出相似的差异（*t* 检验，$P<0.05$，图 4）。与上述结果不同，虽然短翅型雄虫中肠内淀粉酶活性在成虫羽化后 4 d 时高于长翅型雄虫（*t* 检验，$P<0.05$，图 5），但羽化后 0 及 12 d 时，两型雄虫中肠内淀粉酶活性皆无明显差异（*t* 检验，$P>0.05$，图 5）。

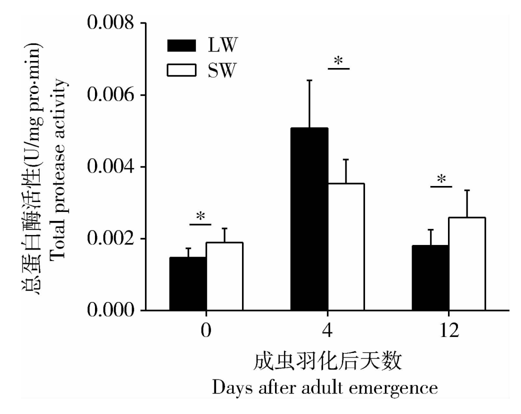



图 2　丽斗蟋长翅型（LW）与短翅型（SW）雄成虫羽化后 12 d 内总蛋白酶活性比较

Fig. 2　Comparison of total protease activity in 0 – 12 day-old long-winged (LW) and short-winged (SW) male adults of *Velarifictorus ornatus*

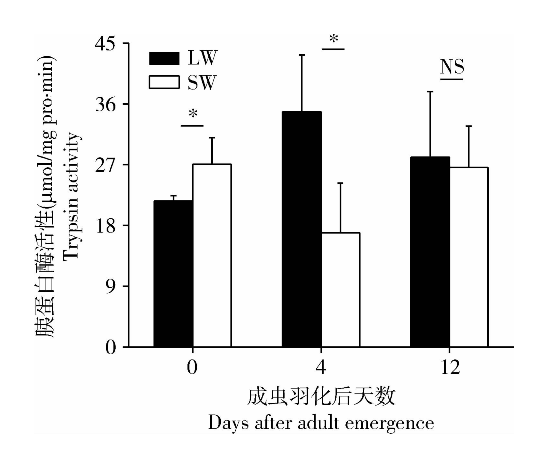



图 3　丽斗蟋长翅型（LW）与短翅型（SW）雄成虫羽 12 d 内胰蛋白酶活性比较

Fig. 3　Comparison of trypsin activity in 0 – 12 day-old long-winged (LW) and short-winged (SW) male adults of *Velarifictorus ornatus*

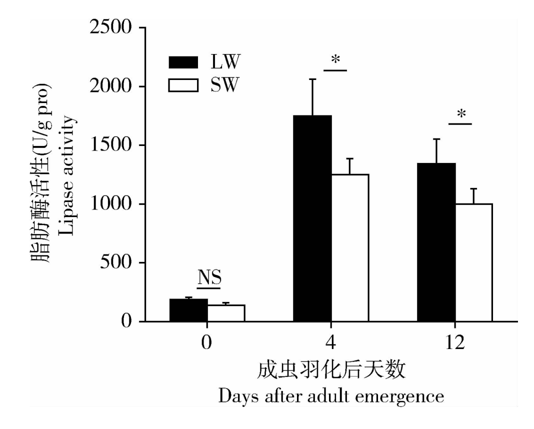



图 4　丽斗蟋长翅型（LW）与短翅型（SW）雄成虫羽化后 12 d 内脂肪酶活性比较

Fig. 4　Comparison of lipase activity in 0 – 12 day-old long-winged (LW) and short-winged (SW) male adults of *Velarifictorus ornatus*

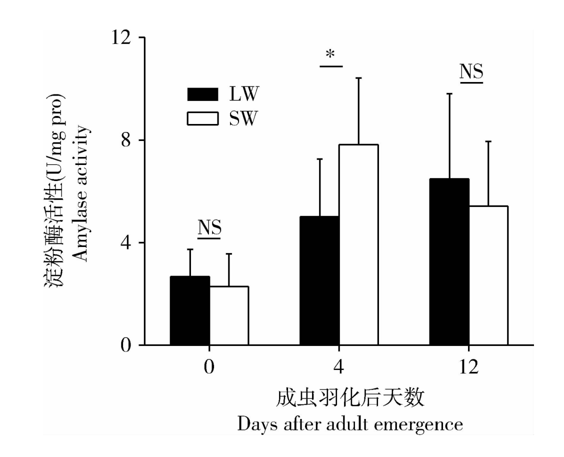



图 5　丽斗蟋长翅型（LW）与短翅型（SW）雄成虫羽化后 12 d 内淀粉酶活性比较

Fig. 5　Comparison of amylase activity in 0 – 12 day-old long-winged (LW) and short-winged (SW) male adults of *Velarifictorus ornatus*

## 3　讨论

过去几十年，关于昆虫飞行与繁殖能力间的负相关关系得到了广泛研究。然而，对单一形态的有翅昆虫而言，虽然存在时间间隔，但扩散与繁殖能力同时发生在成虫阶段，如一些昆虫在经历扩散之后飞行肌开始出现降解，而此时卵细胞并未成熟（Penner，1985）。由于繁殖能力强的个体基本不产

生功能性飞行组织，因此，翅多型昆虫是研究扩散与繁殖能力间负相关关系的理想材料（Mole and Zera, 1993）。

翅二型昆虫飞行与繁殖发育间的差异得到了深入研究，但两型雄虫间食物消化能力是否存在差异却很少报道，而两型雄虫中肠内消化酶活性是否存在不同更是未见报道。Mole 和 Zera（1993）对 *G. rubens* 翅二型雌虫研究结果表明，虽然两型雌虫近似消化率相似，但短翅型雌虫食物转化率与增长率都显著高于长翅型雌虫；我们的研究结果与上述结论不尽相同，虽然与 *G. rubens* 雌虫相似，丽斗蟋翅二型雄虫近似消化率相似，但两型雄虫食物转化率与增长率皆未出现差异。丽斗蟋翅二型雄虫食物转化率未出现差异可能与短翅型雌、雄成虫在羽化后 12 d 内繁殖器官发育所需的能源物质不同有关。短翅型雌虫在成虫羽化后 12 d 内，卵巢鲜重的增长速率或绝对增长量都要显著高于长翅型雌虫（Zhao et *al*., 2010），即在相同发育时间内短翅型雌虫卵巢发育所需的能源物质要多于长翅型雌虫，因此，短翅型雌虫在相同时间内将所消化的营养物质转化为生物量的效率要高于长翅型雌虫才能满足卵巢发育需要更多能源物质的要求。吴红军（2014）研究结果表明，丽斗蟋翅二型雌虫与 *G. rubens* 雌虫相似，短翅型雌虫食物转化显著高于长翅型雌虫食物转化率，进一步验证了我们的推测。与雌虫不同，成虫羽化后 12 d 内，丽斗蟋翅二型雄虫繁殖器官（精巢和附腺）以相似的速率变化且变化幅度也相似（Zhao *et al*., 2010），即两型雄虫繁殖器官发育对总能源的需求是相似的，因此丽斗蟋翅二型雄虫食物转化率及食物利用率相似。

昆虫将消化的食物转化为生物量的效率受中肠内消化酶活性影响（Lazarevic *et al*., 2004），蟋蟀雄虫由于对繁殖行为投资较为分散，在繁殖投资方面对能量的需求可能存在动态变化，因此，我们检测了成虫羽化后不同时期两型雄虫中肠内消化酶活性。虽然昆虫中肠内消化酶活性受昆虫取食的食物类型（Kotkar *et al*., 2009）、昆虫密度（孔龙海等，2012）、pH 值（黄淑娟等，2009）以及昆虫发育阶段（Weidlich *et al*., 2012, 2013）等因素的影响。本实验中两型雄虫饲养密度、温度、饲料及昆虫发育阶段都相同，因此，两型雄虫中肠内消化酶活性差异不会受饲养条件及食物性质等外界因素的影响。丽斗蟋翅二型雄虫羽化后，总蛋白酶、胰蛋白酶、脂肪酶以及淀粉酶活性在成虫羽化后 0 d 时最低，12 d 时次之，4 d 时活性最大，这与 *Gryllus bimaculatus* 中肠内淀粉酶、胰蛋白酶及纤维素酶活性的变化规律相似（Weidlich *et al*., 2012, 2013）。Weidlich 等（2012）对 *G. bimaculatus* 的研究结果表明，*G. bimaculatus* 中肠内消化酶活性变化与其取食量变化有关，且胰蛋白酶活性变化与取食量存在联动关系。丽斗蟋翅二型雄虫中肠内总蛋白酶、胰蛋白酶、脂肪酶以及淀粉酶活性在成虫羽化后 0 d 时最低，12 d 时次之，4 d 时活性最大可能也与成虫的取食量相关，成虫刚羽化时，成虫未开始取食或取食量较少，此时，丽斗蟋中肠内酶活性仅为基本的内源性酶活性，而随着取食量的增加，丽斗蟋中肠内消化酶活性也随之增加，丽斗蟋翅二型雄虫在成虫羽化后 0－2, 2－4 d 内的取食量最大（吴红军，2014），这也与丽斗蟋中肠内消化酶活性在第 4 天最大相吻合，同时也说明丽斗蟋翅二型雄虫消化酶活性的增加同样受取食行为的刺激，而随着成虫羽化 12 d 时取食量的下降，丽斗蟋中肠内消化酶活性也随之下降。

成虫羽化当日，丽斗蟋翅二型雄虫中肠内脂肪酶活性相似，但羽化后 4 d 时，长翅型雄虫中肠内脂肪酶活性显著高于短翅型雄虫，这种差异与丽斗蟋翅二型雄虫对脂肪的需求差异有关。成虫羽化后 10 d 内，两型雄虫繁殖器官内脂肪含量相似，但长翅型雄虫飞行肌内脂肪含量显著高于短翅型雄虫，同时脂肪为长翅型个体飞行的主要能源物质（赵吕权等，2012），因此在相同时间内，长翅型雄虫需要合成较短翅型雄虫更多的脂肪，即长翅型雄虫通过提高中肠内脂肪酶活性，为合成飞行肌所需的脂肪提供能源物质。不仅发育飞行肌需要能源物质，维持飞行肌同样需要能源物质，因此羽化后 12 d 时，长翅型雄虫中肠内脂肪酶活性同样表现为高于短翅型雄虫中肠内脂肪酶活性。

丽斗蟋雄虫羽化 0 d 时，短翅型雄虫总蛋白酶与胰蛋白酶活性高于长翅型雄虫，成虫羽化后 12 d 时，虽然两型雄虫间胰蛋白酶活性无差异，但短翅型雄虫总蛋白酶活性同样显著高于长翅型雄虫，这与成虫羽化后 1 与 12 d 时短翅型雄虫精巢内蛋白质含量高于长翅型雄虫相一致（赵吕权，2012）。与上述结果不同，丽斗蟋成虫羽化后 4 d 时，长翅型雄虫中肠内总蛋白酶与胰蛋白酶活性都显著高于短翅型雄虫，这种变化可能与羽化后 4 d 时长翅型雄虫发育飞行肌需蛋白质有关，且此时长翅型雄虫对短翅型雄虫飞行肌发育所需的蛋白质含量要明显多于短翅型雄虫对长翅型精巢内蛋白质含量，进而表现为

长翅型雄虫中肠内总蛋白酶与胰蛋白酶活性都显著高于短翅型雄虫。另外,虽然我们未能直接检测成虫羽化后 4 d 时,翅二型雄虫繁殖器官与飞行肌内蛋白质含量差异,但成虫羽化后 3 或 5 d 时,长翅型雄虫飞行肌蛋白质含量要显著高于短翅型雄虫,而此时两型雄虫繁殖器官内蛋白质含量却无明显差异(赵吕权, 2012)。

丽斗蟋成虫羽化后 0 或 12 d 时,长翅型雄虫与短翅型雄虫中肠内淀粉酶活性无显著差异,与上述结果不同,成虫羽化后 4 d 时,短翅型雄虫中肠内淀粉酶活性显著高于长翅型雄虫,出现上述现象的原因可能与两型雄虫交配潜能有关,因为我们在后续研究中发现,成虫羽化后早期,短翅型雄虫 24 h 内形成的精包数量显著多于长翅型雄虫(赵吕权等,待发表资料),短翅型雄虫中肠内较高的淀粉酶活性可能有利于短翅型雄虫快速形成精包,以提高其交配潜能,这一推测尚需进一步的验证。

## 参考文献(References)


Fujisaki K, 1992. A male fitness advantage to wing reduction in the oriental chinch bug, *Cavelerius saccharivorus* Okajima (Heteroptera: Lygaeidae). *Researches on Population Ecology*, 34: 173 – 183.

Guerra PA, 2011. Evaluation the life-history trade-off between dispersal capability and reproduction in wing dimorphic insects: a meta-analysis. *Biological Reviews*, 86: 813 – 835.

Huang SJ, Chi M, Mao ZM, Wang SG, Ma XM, 2009. Effects of pH on the digestive protease activity in the midgut of locust *Catantops pinguis* (Stål) (Orthoptera: Catantopidae). *Acta Entomologica Sinica*, 52(3): 254 – 260. [黄淑娟, 迟名, 毛钟鸣, 王世贵, 马小梅, 2009. pH 对红褐斑腿蝗中肠主要蛋白酶活性的影响. 昆虫学报, 52(3): 254 – 260]

Kong HL, Luo LZ, Jiang XF, Zhang L, Yang ZL, Hu Y, 2012. Effects of larval density on food utilization efficiency and digestive enzyme activity of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(3): 361 – 366. [孔海龙, 罗礼智, 江幸福, 张蕾, 杨志兰, 胡毅, 2012. 幼虫密度对草地螟食物利用率及消化酶活性的影响. 昆虫学报, 55(3): 361 – 366]

Kotkar HM, Sarate PJ, Tamhane VA, Gupta VS, Giri AP, 2009. Responses of midgut amylases of *Helicoverpa armigera* to feeding on various host plants. *Journal of Insect Physiology*, 55: 663 – 670.

Langellotto GA, Denno RF, Ott JR, 2000. A trade-off between flight capability and reproduction in males of a wing-dimorphic insect. *Ecology*, 81(3): 865 – 875.

Lazarevic J, Peric-Mataruga V, Vlahovic M, Mrdakovic M, Cvetanovic D, 2004. Effects of rearing density on larval growth and activity of digestive enzymes in *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Lymantriidae). *Folia Biologica*, 52: 1 – 2.

Mitra C, Wagner WE, Zera AJ, Tolle AE, 2011. Variation in singing behaviour among morphs of the sand field cricket, *Gryllus firmus*. *Ecological Entomology*, 36: 152 – 160.

Mole S, Zera AJ, 1993. Differential allocation of resources underlies the dispersal-reproduction trade-off in the wing-dimorphic cricket, *Gryllus rubens*. *Oecologia*, 93: 121 – 127.

Mole S, Zera AJ, 1994. Differential resource consumption obviates a potential flight-fecundity trade-off in the sand cricket (*Gryllus firmus*). *Functional Ecology*, 8: 573 – 580.

Penner M, 1985. Hormonal effects on fright and migration. In: Kerkut GA, Gilbert LI eds. Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry and Pharmacology, Vol. 8. Pergamon Press, New York.

Socha R, 2004. Decreased mating propensity of macropterous morph in a flightless wing-polymorphic insect, *Pyrrhocoris apterus* (Heteroptera). *European Journal of Entomology*, 101: 539 – 545.

Socha R, Hodková M, 2006. Corpus allatum volume-dependent differences in accessory gland maturation in long- and short-winged males of *Pyrrhocoris apterus* (Heteroptera: Pyrrhocoridae). *European Journal of Entomology*, 103: 27 – 32.

Socha R, Šula J, 2008. Differential allocation of protein resources to flight muscles and reproductive organs in the flightless wing-polymorphic bug, *Pyrrhocoris apterus* (L.) (Heteroptera). *Journal of Comparative Physiology B*, 178: 179 – 188.

Socha R, Šula J, Kodrík D, 2004. Wing morph-related differences in developmental pattern of accessory gland proteins in adult males of *Pyrrhocoris apterus* (L.) and their endocrine control. *Journal of Insect Physiology*, 50: 893 – 901.

Stears SC, 1976. Life-history tactics: a review of the ideas. *Quarterly Review of Biology*, 51: 3 – 47.

Tanaka S, 1999. Resource allocation, metabolic rate and hormonal control of the reproductive organs and flight muscle in male adults of a wing dimorphic cricket, *Modicogryllus confirmatus*. *Entomological Science*, 2(3): 315 – 327.

Wang CZ, 1997. Effects of gossypol and tannic acid on the growth and digestion physiology of cotton bollworm larvae. *Acta Phytophylacica Sinica*, 24(1): 13 – 18. [王琛柱, 1997. 棉酚和单宁酸对棉铃虫幼虫生长和消化生理的影响. 植物保护学报, 24(1): 13 – 18]

Weidlich S, Huster J, Hoffmann KH, Woodring J, 2012. Environmental control of trypsin secretion in the midgut of the two-spotted field cricket, *Gryllus bimaculatus*. *Journal of Insect Physiology*, 58: 1477 – 1484.

Weidlich S, Müller S, Hoffmann KH, Woodring J, 2013. Regulation of amylase, cellulase and chitinase secretion in the digestive tract of the two-spotted field cricket, *Gryllus bimaculatus*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 83(2): 69 – 85.

Wu HJ, 2014. Physiological Trade-off between Flight Capability and Reproductive Development and its Regulatory Mechanism in Wing Dimorphic *Velarifictorus ornatus* Crickets. PhD Dissertation, Central South University of Forestry and Technology, Changsha. [吴红军, 2014. 丽斗蟋长短翅型飞行能力与繁殖发育的权衡关系及其调控机制. 长沙: 中南林业科技大学博士学位论文]

Zeng Y, Zhu DH, 2012. Trade-off between flight capability and

reproduction in male *Velarifictorus asperses* crickets. *Ecological Entomology*, 37: 244 - 251.

Zeng Y, Zhu DH, Zhao LQ, 2012. Comparison of flight muscle development, fecundity and longevity between long-winged and short-winged female adults of *Velarifictorus asperses* (Orthoptera: Gryllidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(2): 241 - 246. [曾杨, 朱道弘, 赵吕权, 2012. 长颚斗蟋长翅和短翅型雌成虫飞行肌发育、生殖力及寿命的比较. 昆虫学报, 55(2): 241 - 246]

Zera AJ, Denno RF, 1997. Physiology and ecology of dispersal polymorphism in insects. *Annual Review of Entomology*, 42: 207 - 230.

Zhao LQ, 2012. The Wing Variation and Control Mechanism of Physiological Trade-offs in the Wing-dimorphic Cricket, *Velarifictorus ornatus*. PhD Dissertation, Central South University of Forestry and Technology, Changsha. [赵吕权, 2012. 丽斗蟋的翅型分化及两型间生理权衡机制. 长沙: 中南林业科技大学博士学位论文]

Zhao LQ, Zhu DH, He YY, Yang YP, 2008. Effects of changing photoperiod on nymphal development in a cricket (*Velarifictonus ornatus*). *Acta Ecologica Sinica*, 28(1): 253 - 260. [赵吕权, 朱道弘, 贺一原, 阳艳萍, 2008. 变化光周期对丽斗蟋(*Velarifictonus ornatus*)若虫发育的影响. 生态学报, 28(1): 253 - 259]

Zhao LQ, Zhu DH, Zeng Y, 2010. Physiological trade-offs between flight muscle and reproductive development in the wing-dimorphic cricket *Velarifictorus ornatus*. *Entomologia Experimentalis et Appicata*, 135(3): 288 - 294.

Zhao LQ, Zhu DH, Zeng Y, 2012. Differential allocation of resources to flight muscles and ovaries in different morphs of the wing-dimorphic cricket *Velarifictorus ornatus* (Orthoptera: Gryllidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(9): 1037 - 1045. [赵吕权, 朱道弘, 曾杨, 2012. 丽斗蟋翅二型雌虫飞行肌和卵巢发育间的资源分配差异. 昆虫学报, 55(9): 1037 - 1045]

(责任编辑: 赵利辉)